

На правах рукописи

Вергелес Павел Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
МИКРОСКОПИИ ПЛЕНОК
И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН)

Научный руководитель: **Якимов Евгений Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

Официальные оппоненты:

1. **Штейнман Эдуард Александрович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук, лаборатория спектроскопии дефектных структур (ЛСДС).

2. **Васильев Александр Леонидович**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Электронная микроскопия НИЦ «Курчатовский институт».

Ведущая организация: Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова.

Защита состоится « » 2017 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 002.081.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук по адресу: 142432, г. Черноголовка, Московской области, ул. Академика Осипьяна, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПТМ РАН.

Автореферат разослан « » 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.081.01
кандидат химических наук

Л.А. Панченко.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время GaN и трехкомпонентные твердые растворы на его основе занимают одно из ведущих мест по применению в микроэлектронике. Гетероструктуры, квантовые ямы (КЯ), квантовые точки (КТ), сверхрешетки на основе GaN содержатся в современных светоизлучающих диодах (LED), лазерных диодах и фотоприемниках, работающих в диапазоне от видимого света до ультрафиолета. Гетеропереходы и сверхрешетки являются неотъемлемыми частями транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMTs), различных датчиков газа, биологических датчиков и других устройств.

Это происходит благодаря ряду уникальных свойств GaN, таких как большая ширина запрещенной зоны, высокая теплопроводность, химическая и термическая стойкость, которые обеспечивают необходимые рабочие характеристики приборов, созданных на его основе.

Быстрое развитие промышленного применения нитридов III группы, опередившее необходимые фундаментальные исследования, стимулирует интерес к изучению электрических и оптических свойств этих материалов [1]. До сих пор остаются мало исследованными такие свойства нитридов III группы, как механизмы безызлучательной рекомбинации, стабильность оптических свойств при электронном и/или фотонном возбуждении, поведение протяженных дефектов и их влияние на квантовую эффективность и деградацию таких структур. Крайне важна информация о структуре дефектов и их эволюции при различных процедурах, об электронных и оптических переходах в таких объектах.

Подавляющее большинство производимых в настоящее время полупроводниковых структур для микроэлектроники на основе III-нитридов выращивается на сапфировых подложках, между которыми и последующим эпитаксиальным слоем GaN, а также между отдельными трехкомпонентными эпитаксиальными слоями имеется существенное несоответствие параметров решеток, что приводит к чрезвычайно высокой плотности дислокаций (порядка $10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$) в этих структурах.

Несмотря на такую высокую плотность дефектов, светоизлучающие структуры на основе систем квантовых ям InGaN/GaN, выращенные на некоторых фирмах, демонстрируют высокую квантовую эффективность. По этой причине свойства проникающих дислокаций в нитриде галлия и структурах на его основе выглядят особенно интригующими. Исследование характеристик отдельных проникающих дислокаций в светодиодах и других гетероструктурах на основе GaN является необходимым для надежного предсказания их влияния на производительность и деградацию, понимания механизмов подавления воздействия дислокаций на эффективность излучательной рекомбинации, для развития подходов к контролю их свойств.

Слабое влияние дислокаций на рабочие параметры приборов на основе нитридов третьей группы объясняется по-разному: для светодиодов — флуктуациями состава твердого раствора в множественных квантовых ямах (МКЯ) InGaN/GaN, подобных квантовым точкам, либо эффективным экранированием дислокаций в областях двумерного газа в HEMTs.

Экспериментальные исследования свойств протяженных дефектов, локальных электрических и оптических параметров в пленках и структурах с КЯ на основе GaN являются весьма актуальными как с практической, так и с фундаментальной точки зрения.

Методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) получили широкое применение для локальной диагностики полупроводниковых кристаллов и структур на их основе [2–6]. Это связано с возможностью достижения в РЭМ пространственного разрешения в микронном и субмикронном диапазонах, информативностью этих методов, а также возможностью совмещения нескольких методов в одном приборе.

Одним из основных параметров, определяющих качество полупроводниковых материалов для микроэлектроники, является диффузионная длина неосновных носителей заряда в этих материалах.

Известно, что пленки GaN и гетероструктуры на его основе являются полупроводниками с малой диффузионной длиной и при этом существенно неоднородны в латеральном направлении.

Метод наведенного сфокусированным электронным пучком тока (НТ) (EBIC — Electron Beam Induced Current), обладая высоким латеральным разрешением, наилучшим образом подходит для исследования полупроводников с малой диффузионной длиной, в частности GaN и трехкомпонентных твердых растворов на его основе, позволяя определить влияние локальных неоднородностей в этих структурах на их основные характеристики.

Однако исследование этих структур методами сканирующей электронной микроскопии (РЭМ методы) приводит к высокой дозе облучения. Так, чтобы получить одно РЭМ-изображение при стандартных условиях с увеличением $\times 100000$ и током пучка 10^{-10} А, исследуемые образцы получают дозу облучения, равную 0.2 Кл/см². Рост увеличения и/или тока пучка приводит к повышению этой дозы, что может существенно повлиять на оптоэлектрические свойства изучаемого материала.

Поэтому изучение воздействия низкоэнергетического облучения электронным пучком (LEEBI — low energy electron beam irradiation) и понимание механизмов этого воздействия очень важны для надежной характеристики наноструктур на основе InGaN/GaN при исследовании их методами РЭМ.

Цель работы заключается в исследовании методами наведенного тока и катодолюминесценции светодиодов на основе системы множественных квантовых ям InGaN/GaN и пленок GaN, изучении рекомбинационных свойств

и роли протяженных дефектов в этих структурах, а также влияния облучения низкоэнергетичным пучком на оптические и электрические характеристики светоизлучающих структур.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать в режиме НТ локальные неоднородности в пленках GaN, особенно в пространственно неоднородных латерально зарощенных пленках (ELOG) нитрида галлия. Измерить значения основных электрических характеристик: диффузионной длины неосновных носителей заряда, ширины области пространственного заряда (ОПЗ), эффективной концентрации доноров для отдельных областей латерально зарощенных пленок на основе GaN. Установить достоверность измеренных локальных характеристик путем сравнения с вольт-фарадными измерениями.

2. Измерить плотность протяженных дефектов в отдельных областях латерально зарощенных пленок GaN и выявить корреляцию плотности дислокаций с диффузионной длиной в этих областях.

3. Разработать методы измерения в режиме НТ основных электрических характеристик для локальных областей светоизлучающих структур на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN.

4. Исследовать в режиме наведенного тока и катодолюминесценции (КЛ) влияние облучения низкоэнергетичным электронным пучком на оптические и электрические свойства светоизлучающих структур, содержащих квантовые ямы InGaN/GaN. Провести исследование воздействия облучения электронным пучком на дефектную структуру в латерально зарощенных пленках GaN.

Научная новизна

1. Впервые измерены локальные электрические характеристики в отдельных областях латерально зарощенных пленок на основе нитрида галлия. Установлено, что эффективные концентрации доноров в областях вертикального и латерального роста ELOG пленок различаются не менее, чем в 3 раза, что качественно характеризует вероятность встраиваемости легирующей примеси в различных плоскостях роста. Подтверждено предположение о зависимости ширины изображений проникающих дислокаций в режиме наведенного тока как от величины диффузионной длины, так и от размера ОПЗ.

2. Проведены измерения локальных значений диффузионной длины неосновных носителей заряда и эффективной концентрации доноров в голубых светоизлучающих структурах на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN на областях размером порядка 1 мкм.

3. Установлено, что измерения методом наведенного тока позволяют оценить параметр, характеризующий вероятность рекомбинации носителей заряда в активном слое светодиодов. Показано, что на светодиодах с высокой эффективностью метод НТ позволяет визуализировать каналы утечек тока или

повышенного транспорта неосновных носителей заряда через активный слой структуры в виде дефектов, дающих светлый контраст.

4. Обнаружен и объяснен аномально медленный спад сигнала наведенного тока вне барьера Шоттки, наблюдаемый вблизи границы срачивания областей латерального роста ELOG пленок нитрида галлия. Установлено, что увеличение концентрации легирования Si устраняет этот эффект. Показано, что граница срачивания встречных фронтов роста является заряженным протяженным дефектом.

5. Впервые показано, что при воздействии облучения низкоэнергетичным электронным пучком на светоизлучающие структуры с множественными квантовыми ямами на основе InGaN/GaN в спектрах излучения квантовых ям возникают новые более интенсивные линии свечения, смещенные в синюю область относительно исходной линии излучения. При этом положение исходной линии излучения сохраняется, и ее интенсивность практически не меняется, что свидетельствует о локальном характере изменений, происходящих в активном слое структуры. Показано, что такие изменения вероятнее всего происходят вблизи структурных дефектов — проникающих дислокаций или их пучков. Предложен механизм влияния облучения электронным пучком на исследуемые структуры — релаксация при облучении напряжений, возникающих в активной области вследствие несоответствия параметров решеток слоев GaN и InGaN.

6. Обнаружено движение сегментов дислокаций при облучении в сканирующем электронном микроскопе низкоэнергетичным электронным пучком. Показано, что скольжение дислокаций может наблюдаться даже при очень низких уровнях возбуждения.

Практическая значимость работы

Предложенные методы измерения основных электрических характеристик голубых светодиодов, оценка на их основе вероятности рекомбинации носителей заряда в активном слое светоизлучающих структур, а также обнаруженная в режиме НТ визуализация каналов утечек носителей заряда могут найти применение (оказаться полезными) при оптимизации параметров светоизлучающих структур. Разработанные методы измерения электрических характеристик отдельных областей в ELOG пленках GaN и полученные благодаря им результаты дают важную информацию, которую необходимо принимать во внимание при разработке более эффективных лазерных структур.

Результаты исследования влияния облучения электронным пучком пленок GaN и гетероструктур на его основе могут оказаться полезными для понимания процессов деградации приборов, содержащих эти структуры, поскольку инжекция носителей заряда при помощи электронного пучка аналогична инжекции носителей заряда, происходящей во время их работы.

Положения, выносимые на защиту

1. Дефекты в светоизлучающих структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN, имеющие светлый контраст на изображениях светодиодов в режиме наведенного тока и локально меняющие электрические характеристики структур, обусловлены каналами утечек тока.

2. Имеется корреляция между плоскостями роста слоев латерально разросшейся пленки GaN и вероятностью встраиваемости легирующей примеси. Эффект аномального спада сигнала наведенного тока вдоль границы сращивания противоположных фронтов роста пленки вне барьера Шоттки определяется зарядом границы сращивания.

3. Основным механизмом воздействия облучения низкоэнергетичным электронным пучком на оптические свойства светоизлучающих структур, содержащих множественные квантовые ямы InGaN/GaN, является релаксация напряжений в решетке активного слоя.

4. Облучение низкоэнергетичным электронным пучком оказывает влияние на дефектную структуру латерально разросшихся пленок нитрида галлия и вызывает радиационно ускоренное скольжение дислокаций.

Личный вклад автора. Образцы латерально заросших пленок GaN были предоставлены Смирновым Н.Б., Говорковым А.В. и Поляковым А.Я., образцы светоизлучающих структур предоставила Шмидт Н.М. Большая часть экспериментальной работы и обработка полученных экспериментальных данных проведена автором лично. Вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном участии на всех этапах работы от постановки задачи до обсуждения результатов. Автору принадлежит анализ существующих литературных данных, реализация основных экспериментальных подходов, интерпретации, обобщения и анализ полученных результатов, формулировки основных положений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах:

Всероссийская конференция "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия: Структуры и Приборы" (Москва 2007, 2010, 2013, 2017, Санкт-Петербург 2008, 2011, 2015); Международная конференция по дефектам в полупроводниках (ICDS, Альбукерк, Нью Мехико 2007, Санкт-Петербург 2009, Болонья, Италия 2013, Эспоо, Финляндия 2015); Международный симпозиум по росту III-нитридов (ISGN, Идзу, Япония 2008, Санкт-Петербург 2012, Хамакатсу, Япония 2015); Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ, г. Черноголовка 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016); Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел РЭМ (г. Черноголовка, 2007, 2011, 2013, 2015); Международный симпозиум "Наноструктуры: Физика и Технологии" (Санкт-Петербург 2006);

Международная Конференция по пучковым методам исследования микроструктур в полупроводниках (BIAMS, Санкт-Петербург 2006, Толедо, Испания 2008, Халле, Германия 2010, Цукуба, Япония 2014, Версаль, Франция 2016); Национальная конференция по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов. (РСНЭ, Москва, 2007); Международная конференция по нитридным полупроводникам (ICNS, Пекин, Китай 2015); Международная конференция по протяженным дефектам в полупроводниках (EDS, Брайтон, Великобритания 2010); Международная конференция "Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов" (Москва, 2015); Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 2015); Международный симпозиум "Нанозифика и Нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2014); Всеросс. конф. молодых ученых "Микро-, нанотехнологии и их применение" (Черноголовка 2010, 2014).

Публикации. Результаты работы опубликованы в 26 статьях в российских и международных научных журналах, из них 26 в изданиях из перечня ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста. Диссертация включает 54 рисунка и список литературы из 136 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту. Также описана структура диссертации и представлены сведения об апробации результатов работы.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации, содержащей результаты по исследованию локальных свойств и свойств протяженных дефектов в пленках GaN и структурах на его основе методами РЭМ. Описаны преимущества метода НТ как одного из основных методов РЭМ, применяемых для определения локальных электрических параметров полупроводниковых материалов. Для планарных полупроводниковых пленок и структур сравниваются два метода измерений, предложенных ранее для исследований в режиме наведенного тока. Показано, что для полупроводниковых материалов на основе GaN, имеющих субмикронную диффузионную длину неосновных носителей заряда, наиболее подходящим и надежным является метод, основанный на измерении зависимости собранного НТ от ускоряющего напряжения пучка, когда неравновесные носители заряда генерируются пучком под коллекторным переходом [7,8].

Приведен краткий обзор основных результатов исследований различными методами проникающих дислокаций в пленках III-нитридов, являющихся наиболее важными протяженными дефектами в рассматриваемых структурах.

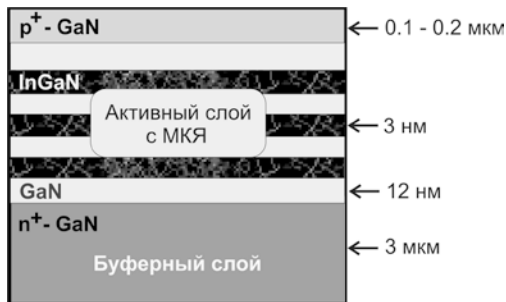
Несмотря на противоречивость мнений о роли дислокаций в пленках нитрида галлия, все больше фактов указывают на то, что протяженные дефекты являются одним из главных факторов, влияющих на рабочие параметры светодиодов, лазеров и НЕМТs. Кратко описан механизм формирования изображения полупроводников в режиме наведенного тока, позволяющий получать необходимую для исследования дислокаций количественную информацию об отдельных дефектах. При этом имеющиеся результаты для III-нитридов указывают на наличие связи между диффузионной длиной и профилем изображения дислокации в режиме НТ.

Далее приведены результаты исследования латерально зарощенных пленок GaN, в которых плотность дислокаций, чрезвычайно высокая в III-нитридах, локально понижается в областях латерального роста. Отмечено, что экспериментальных исследований по сравнению электрических свойств отдельных областей ELOG пленок, имеющих различную плотность дислокаций, практически не было проведено.

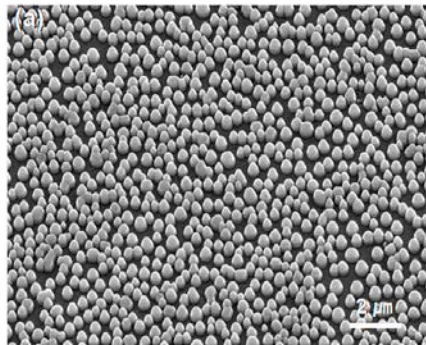
Применение методов РЭМ для локальной диагностики полупроводниковых материалов сопровождается высокой дозой облучения исследуемых образцов. Приводятся результаты изучения влияния облучения электронным пучком на пленки нитрида галлия, основными из которых являются диссоциация Mg-N комплексов и перераспределение In в квантовых ямах InGaN. При этом наблюдалось синее смещение полосы излучения, связанного с квантовыми ямами InGaN, и увеличение его интенсивности, имеющие довольно противоречивые объяснения, связывающие изменения энергии излучения и его интенсивности с влиянием пьезоэлектрического поля в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN. Приведены факты, указывающие на сходство процессов, происходящих при облучении электронным пучком и при действии прямого тока инжекции в светодиодах на основе нитрида галлия.

Во второй главе приведено описание исследуемых структур: пленок GaN, голубых светодиодов с множественными КЯ на основе системы InGaN/GaN, латерально зарощенных пленок GaN, а также структур со светодиодными наностолбиками (рис. 1).

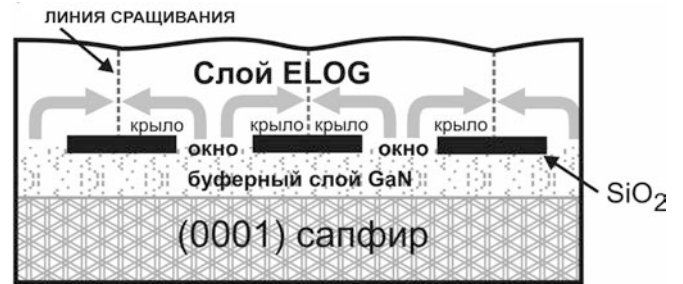
Представлены методики, применявшиеся для изучения электрических и оптических свойств исследуемых образцов: измерение и моделирование зависимости спада НТ от расстояния между точкой падения электронного пучка и краем коллектора, зависимости эффективности собирания неосновных носителей заряда от ускоряющего напряжения в случаях *p-n* перехода и барьера Шоттки. Для случая барьера Шоттки приведена методика измерения локальной эффективности собирания неосновных носителей заряда. Кратко описаны формирование контраста изображений в режиме НТ и КЛ, расчет ширины ОПЗ коллектора и метод C-V измерений для определения концентрации легирующей примеси в полупроводниках. Далее приводятся описания используемых в работе приборов и параметров измерений.



а



в



б

Рис. 1. а — схематическое строение исследуемых светоизлучающих структур; б — схематическое изображение поперечного среза ELOG-пленки GaN; в — изображение наностолбиков в режиме ВЭ

В третьей главе приведены результаты исследования методом наведенного тока MOCVD и ELOG пленок GaN. В MOCVD пленках GaN для исследуемых образцов с разной концентрацией легирующей примеси в режиме НТ были измерены основные электрические характеристики: диффузионная длина и ширина ОПЗ. В режиме НТ получены изображения пленок GaN, позволяющие наблюдать отдельные дислокации. Показано, что ширина изображения дислокаций заметно увеличивается как при уменьшении концентрации доноров (увеличении ширины ОПЗ), так и при увеличении диффузионной длины. Полученные результаты подтвердили предположение о зависимости ширины изображений проникающих дислокаций как от величины диффузионной длины, так и от размера ОПЗ.

В режиме НТ были получены изображения ELOG структур, распределение сигнала на которых качественно соответствовало ожидаемому результату применяемой для изготовления пленок GaN технологии латерального зарастивания — локальному улучшению качества кристалла (рис. 2а). Темные точечные дефекты на изображениях ELOG пленок в режиме НТ, соответствующие проникающим дислокациям, имели низкую плотность на участках над полосами маски (области крыльев) — $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ и более высокую в области окон — порядка 10^8 см^{-2} . Отмечено влияние толщины ELOG слоя на характер изображений пленок в режиме НТ. На изображениях пленок с тонким ELOG слоем (6 мкм) выявлены темные изогнутые горизонтальные линии с

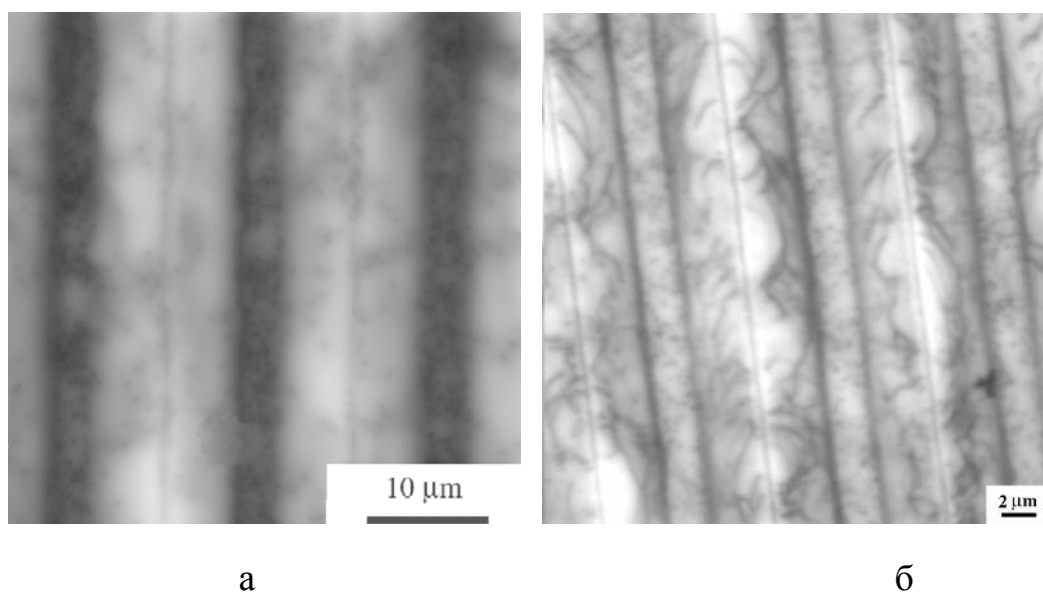


Рис. 2. Изображение ELOG-пленок в режиме НТ: а — изображение толстой ELOG-пленки; б — тонкой (6 мкм)

относительно высокой плотностью, соответствующие сегментам дислокаций, лежащим в базисной плоскости или наклоненным к поверхности пленки и частично изогнутым при латеральном разрастании GaN (рис. 2б). Показано, что для эффективного снижения плотности протяженных дефектов в областях крыльев необходима толщина ELOG слоя, по меньшей мере, 10 – 12 мкм.

Путем измерения и моделирования локальной эффективности сбора были получены значения эффективной концентрации нескомпенсированных доноров и диффузионной длины в областях окон и крыльев ELOG пленок. Полученные локальные значения концентраций доноров были меньше нижнего предела измерений методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Показано, что в областях с различным направлением роста пленки GaN наряду с неоднородным распределением дефектов наблюдается неоднородное распределение концентрации доноров (рис. 3). Концентрация доноров в областях над полосами маски регулярно не менее чем в три раза ниже концентраций доноров в областях вертикального роста в окнах маски SiO₂. Показано, что значения локальных эффективных концентраций доноров, найденные методом НТ в крыле и окне, близки к тем, которые получаются соответственно из C-V измерений на ELOG-пленках и в буферных слоях. Это подтверждает надежность оценок методом НТ локальных концентраций доноров в ELOG пленках GaN.

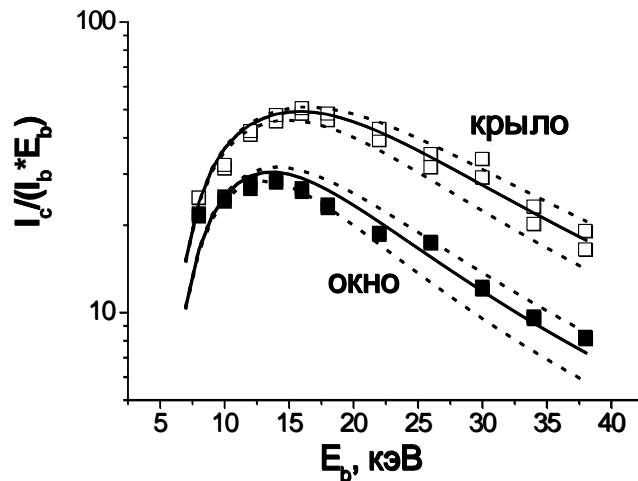


Рис. 3. Зависимость $I_c(E_b)$, измеренная на нелегированной пленке ELOG01 в светлой (крыло) и темной (окно) областях. Зависимости, рассчитанные с N_d , равной 1 и $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и диффузионной длиной L , равной 300 и 170 нм для светлых и темных областей, показаны сплошными линиями. Пунктирными линиями обозначены зависимости, рассчитанные для $300 \pm 30\%$ и $170 \pm 30\%$ нм значений L

На изображениях в режиме НТ ELOG пленок вне барьера Шоттки был обнаружен аномально медленный спад сигнала НТ вдоль границы сращивания ELOG областей над полосой маски. Такой спад сигнала был объяснен наличием вблизи границы сращивания крыльев, где сильно повышается плотность дефектов, изгиба энергетических зон, который приводит к разделению e-h пар и аномальному транспорту неравновесных носителей заряда. Эти объяснения были подтверждены путем сравнения изображений ELOG пленок в режимах КЛ и НТ. Установлено, что повышение уровня легирования Si устраняет эффект аномального спада сигнала НТ вдоль границы сращивания.

В четвертой главе представлены результаты исследования методом наведенного тока светоизлучающих структур с системой множественных квантовых ям InGaN/GaN с различным их числом (от 1 до 5 КЯ). На основе измерения и моделирования зависимостей эффективности сбора НТ для светодиодов были получены значения диффузионной длины неосновных носителей заряда и ширины ОПЗ. Установлено, что в светоизлучающих структурах с малым числом КЯ квантовые ямы практически не влияют на эффективность сбора носителей заряда, в то время как для структур с 5 КЯ необходимо вводить поправочный коэффициент k , меньший единицы, количественно характеризующий эффективность рекомбинации неосновных носителей заряда в квантовых ямах (рис. 4). Полученные значения коэффициента k хорошо согласуются с величиной внешнего квантового выхода светодиодов: высокий квантовый выход был получен на светодиодах с 5 КЯ, в которых коэффициент k был заметно ниже единицы, а для светодиодов

с 2 – 3 КЯ, в которых поправочный коэффициент k близок к 1, квантовый выход при том же токе был существенно ниже.

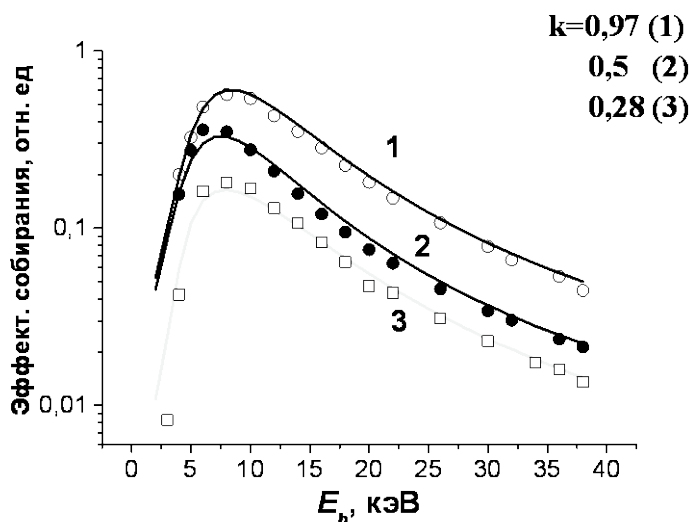


Рис. 4. Экспериментальные (квадраты и кружки) и моделированные (линии) зависимости $\beta(E_b)$ для структур с тремя (1) и пятью (2, 3) квантовыми ямами

Были получены и проанализированы изображения исследуемых светодиодов в режиме НТ (рис. 5). На изображениях светодиодов с коэффициентом k , близким к единице (рис. 5а), были обнаружены темные

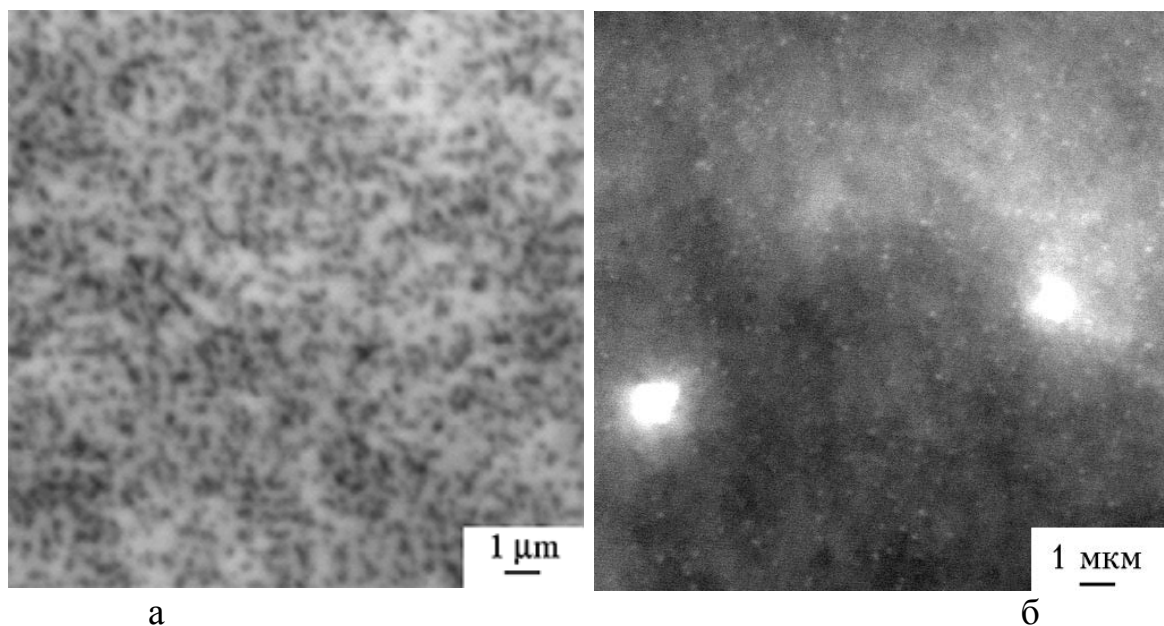


Рис. 5. Изображения светоизлучающих структур в режиме НТ: а — с 3 КЯ (k близко к единице); б — с 5 КЯ (k меньше единицы). Ускоряющее напряжение 35 кэВ

точки с плотностью около $10^8 - 10^9$ см⁻², совпадающей с плотностью проникающих дислокаций, наблюдаемой в выращенных при аналогичных условиях пленках GaN. Это позволило связать наблюдаемые дефекты с

проникающими дислокациями, изображения которых в режиме НТ формируются в нижнем квазинейтральном слое GaN. Сделанный вывод подтверждается сравнением поперечных размеров темных точек на изображениях светодиодов и эпитаксиальных пленок GaN.

На изображениях в режиме НТ исследуемых структур с низкой эффективностью собирания (высокая вероятность рекомбинации неравновесных носителей заряда в КЯ, $k < 0.6$, рис. 5б) темные точки практически не выявлялись, но на фоне областей с крупномасштабной неоднородностью контраста были обнаружены два типа дефектов, дающих светлый контраст. Показано, что дефекты первого типа в виде светлых точек размером 0.1 – 0.2 мкм с контрастом порядка 1 – 3%, плотность которых соответствует плотности проникающих дислокаций в светодиодах с малым числом КЯ, можно ассоциировать с одиночными проникающими дислокациями.

Изображения дефектов второго типа, наблюдаемые во всем диапазоне используемых энергий пучка (от 10 до 35 кэВ), имели размеры порядка 1 мкм, и связанный с ними контраст мог достигать 50%. Плотность дефектов второго типа была существенно ниже, чем плотность дефектов первого типа, и в исследованных нами структурах не превышала 10^5 см^{-2} .

Высокий контраст дефектов второго типа на изображениях светодиодов в режиме НТ позволил измерить в области таких дефектов зависимость эффективности собирания от ускоряющего напряжения и рассчитать по ней значение диффузионной длины неравновесных носителей заряда, которое оказалось близким к значению диффузионной длины неосновных носителей заряда вдали от дефекта (рис. 6). Этот факт указывает на отсутствие в области больших светлых дефектов электрических полей, влияющих на транспорт неравновесных носителей заряда в нижнем слое GaN.

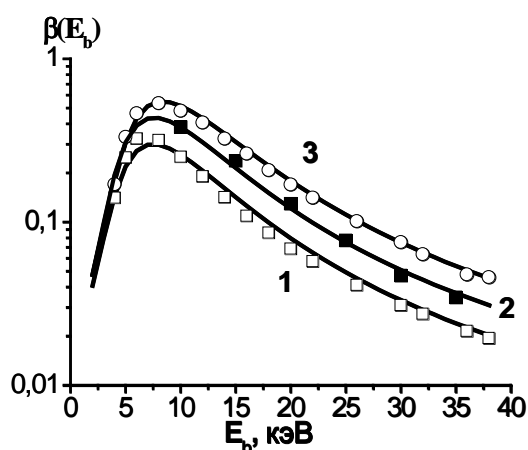


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и моделированные (линии) зависимости $\beta(E_b)$ для структуры с 5 КЯ вдали от светлого дефекта (кривая 1), для той же структуры в области крупного дефекта со светлым контрастом (2) и для структуры с 3 КЯ (3)

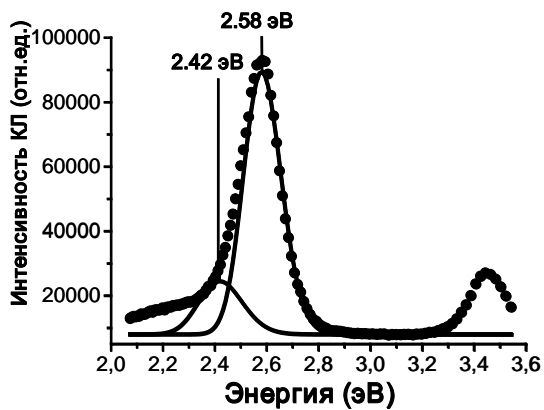
Показано, что причиной появления светлого контраста является локальное повышение вблизи таких дефектов, пронизывающих активный слой светоизлучающей структуры, вероятности туннелирования неосновных носителей заряда между соседними КЯ через барьеры из GaN. Проведенные исследования зависимости величины светлого контраста второго типа от тока пучка показали, что контраст дефектов второго типа падает с повышением тока от 10^{-10} до 10^{-8} А в 2 – 3 раза, и его зависимость от тока пучка близка к логарифмической. При этом средняя диффузионная длина неосновных носителей заряда и вероятность рекомбинации внутри ОПЗ практически не зависели от уровня возбуждения. Это подтверждает предположение о том, что дефекты со светлым контрастом второго типа являются каналами повышенного туннелирования носителей заряда поперек активного слоя голубых светодиодов.

Поскольку размер больших светлых дефектов может быть оценен в несколько сотен нм, их можно связать с пучками дислокаций или с V-дефектами.

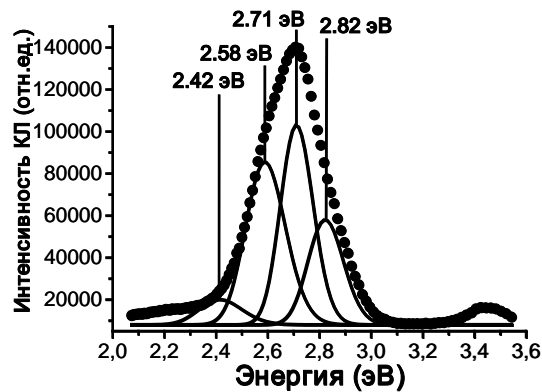
В пятой главе приведены результаты исследований влияния облучения электронным пучком низкой энергии на электрические и оптические свойства пленок GaN и светоизлучающих структур на его основе.

Для светоизлучающих структур на основе системы МКЯ InGaN/GaN были измерены спектры КЛ для различных доз облучения электронным пучком, которое в некотором приближении является аналогом инжекции неравновесных носителей заряда, происходящей при функционировании светоизлучающих структур. Установлено, что на всех этапах облучения излучение, связанное с активным слоем, вносит основной вклад в интегральную интенсивность КЛ, которая в результате облучения заметно возрастает, при этом максимум излучения смещается от исходного положения в синюю область (рис. 7 а). После достаточно продолжительного облучения интегральная интенсивность КЛ начинает медленно уменьшаться, что может быть связано с известным эффектом образования углеродородной пленки на поверхности образца.

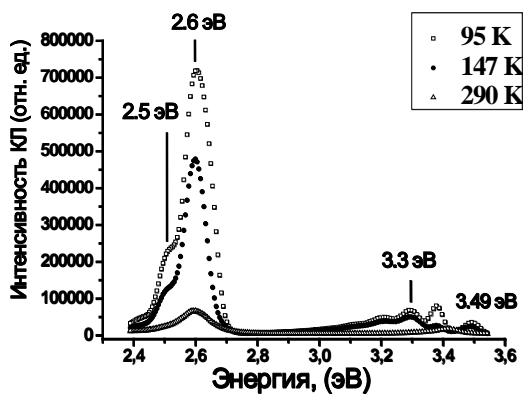
Путем разложения спектров КЛ МКЯ на гауссовы кривые показано, что во всех исследованных светоизлучающих структурах при ЛЕЕВИ в дополнение к первоначальной линии излучения КЯ появляются одна или две новые линии, смещенные по отношению к исходной линии в синюю область спектра (рис. 7 а, б). Интенсивность новых линий увеличивается под действием облучения и начинает существенно превышать первоначальную интенсивность излучения, при этом исходная линия сохраняет свое положение, но ее интенсивность либо не изменяется, либо слабо понижается. Измерение спектров КЛ при низких температурах (от температуры жидкого азота до комнатной) для разных доз облучения подтвердило эти результаты. При температуре жидкого азота на облученном участке в области излучения КЯ наблюдалось четкое разделение исходной линии излучения и новой линии, появляющейся в результате облучения (рис. 7 в, г).



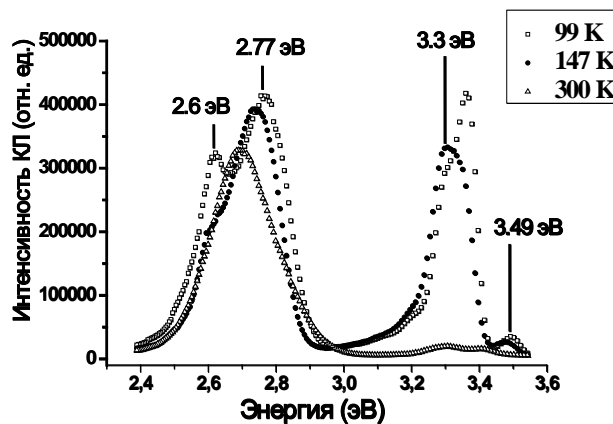
а



б



в



г

Рис. 7. Разложение исходного и облученного (доза облучения $1,3 \text{ Кл см}^{-2}$) спектров КЛ, на гауссовы кривые. Измеренные спектры показаны кружками; сплошными линиями показаны смоделированные гауссовы кривые с максимумами при 2,55 (1), 2,69 (2) и 2,83 эВ (3). На рисунках в и г соответственно приведены спектры излучения КЛ для необлученного и облученного фрагмента светоизлучающей структуры с 5 КЯ при нескольких температурах

Показано, что степень восстановления исходных оптических свойств облученных структур зависит от дозы облучения, и полное восстановление не достигается даже при хранении облученных образцов на воздухе в течение нескольких месяцев.

Было исследовано влияние на трансформацию оптических свойств светодиодов изменений условий, при которых происходит LEEBI: ускоряющего напряжения облучающего пучка и напряжения, приложенного к структуре при ее облучении.

Было установлено, что, в результате облучения исследуемых структур электронным пучком с различными энергиями от 5 до 35 кэВ не происходит качественного изменения эволюции их спектров люминесценции. Однако меняется скорость эволюции спектров КЛ и интенсивность новых линий

излучения. При этом максимальное влияние ЛЕЕВИ на исследуемые структуры наблюдается при энергиях облучающего пучка, приводящих к максимальной концентрации носителей заряда в квантовых ямах. Для исследуемых структур эта энергия находилась в области 10 кэВ. Эти результаты позволили сделать вывод об определяющей роли инжекции неравновесных носителей заряда в активную область в эволюции спектров КЛ светоизлучающих структур при ЛЕЕВИ и исключить предположение об основополагающем влиянии процессов, происходящих на поверхности структур.

Для подтверждения этого вывода была исследована зависимость скорости эволюции спектров КЛ МКЯ от приложенного при ЛЕЕВИ напряжения. Известно, что приложенное обратное напряжение повышает скорость туннелирования неравновесных носителей заряда из КЯ, в то время как прямое напряжение, наоборот, увеличивает количество носителей заряда в обедненном слое. Трансформация спектров КЛ, измеренных при разных дозах облучения, происходила медленнее при приложенном к образцу обратном напряжении, чем при прямом.

Также было исследовано влияние приложенного обратного напряжения на интенсивность спектров КЛ МКЯ и положение их максимумов для облученного при нулевом смещении фрагмента образца с разными дозами облучения (рис. 8 а, б). Показано, что уже при малых дозах облучения (около 0.2 Кл/см^2), когда еще на спектрах КЛ слабо проявляются изменения оптических свойств активного слоя, заметно меняются электрические свойства светоизлучающей структуры. По сравнению с необлученным образцом существенно падают зависимости как интенсивности КЛ, так и положения максимума от приложенного обратного напряжения. Возможным объяснением наблюдаемых изменений является стимулированная при облучении электронным пучком диссоциация Mg–N пар, при этом освободившийся водород может диффундировать вглубь кристалла, пассивируя акцепторы. В результате

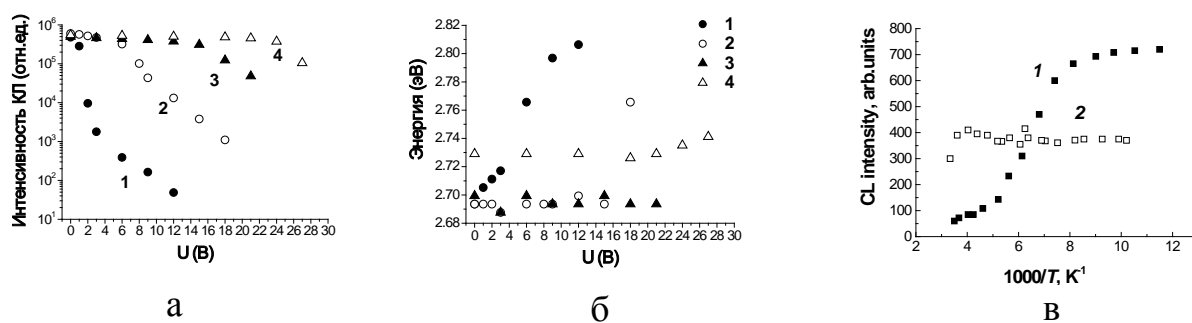


Рис. 8. Зависимости интенсивности и положения максимума спектра КЛ (а и б соответственно) от приложенного напряжения для необлученного участка (1) и облученного с дозой 0.18 (2), 0.37 (3) и 1.1 Кл/см² (4); в – температурные зависимости интенсивности исходной линии КЛ для необлученной области (кривая 1) и новой линии КЛ КЯ для облученной области (кривая 2)

происходит повышение эффективной концентрации доноров в активной области и соответствующее уменьшение ширины ОПЗ. Тогда КЯ оказываются в области слабого поля или вообще могут выйти из ОПЗ, что и ограничивает влияние на них приложенного обратного напряжения. Такая модель косвенно подтверждается ростом с дозой облучения в эволюции спектров линии излучения, предположительно связанной с Mg, и ростом концентрации доноров, подтвержденной измерениями зависимости эффективности сбора от ускоряющего напряжения при разных дозах облучения.

При росте доз облучения свыше 1 Кл/см^2 становится заметным изменение оптических свойств КЯ, проявляющееся в сдвиге максимума излучения в синюю область и росте интенсивности излучения из КЯ. Обнаруженную трансформацию спектров КЛ при облучении можно объяснить двумя способами: стимулированной облучением диффузией In или уменьшением встроенных электрических полей в активном слое. Диффузия In, наблюдаемая при инъекции носителей заряда в КЯ светодиодов в работах, ведет к появлению областей с пониженным содержанием In, имеющих более высокую энергию излучения. Это может объяснить сдвиг максимума излучения КЯ при облучении в синюю область, однако при этом нельзя объяснить рост интенсивности излучения. Более того, измерения зависимости от температуры интенсивности исходной полосы излучения на необлученном образце и новой полосы КЛ на облученном фрагменте показали, что в местах излучения новой полосы существенно возрастает локализация носителей заряда, что не может происходить при уменьшении концентрации In (рис. 8в).

Уменьшением встроенного электрического поля в активном слое можно объяснить одновременно как сдвиг максимума спектра излучения в синюю область, так и рост интенсивности излучения КЯ [9–11]. Встроенное электрическое поле в рассматриваемых светодиодах определяется полем пьезоэлектрической поляризации, возникающим в результате действия сжимающих тангенциальных напряжений в КЯ [10]. Это поле может быть скомпенсировано путем зарядки/перезарядки дефектов или уменьшено вследствие релаксации напряжений.

Обнаруженное при длительном облучении исчезновение на изображениях светодиодов в режиме НТ светлого контраста указывает на возможность перезарядки в процессе облучения светлых дефектов, исходно являющихся каналами повышенного туннелирования дырок.

Однако, изменение встроенного электрического поля за счет перезарядки дефектов не может полностью обеспечить наблюдаемую трансформацию оптических свойств исследуемых светоизлучающих структур при LEEVI, поскольку тогда со временем должен был бы наблюдаться возврат структуры к состоянию до облучения, однако, согласно проведенным исследованиям эффект воздействия LEEVI на светодиоды частично сохраняется даже по прошествии нескольких месяцев

Другой способ уменьшения величины квантово-размерного эффекта Штарка — это релаксация напряжений в кристаллической решетке структуры в области квантовых ям. В таком случае индуцированное релаксацией сжимающих напряжений ослабление пьезополя приводит, во-первых, к уменьшению наклона запрещенной зоны и, соответственно, к возрастанию эффективной ширины оптического перехода (будет наблюдаться синее смещение излучения КЛ), а, во-вторых, к увеличению глубины КЯ для носителей заряда (будет повышаться интенсивность КЛ).

Таким образом, наиболее вероятной моделью воздействия продолжительного облучения электронным пучком на оптические свойства светоизлучающих структур представляется комбинация как перезарядки доноров/акцепторов, так и релаксации напряжений в решетке в области КЯ, что ведет к частичному сохранению наблюдаемых эффектов.

Подтверждение того, что при облучении может происходить релаксация напряжений, дали сравнительные исследования влияния LEEBI на оптические свойства планарной структуры с МКЯ и наностолбиков, созданных путем сухого травления из этой планарной структуры. Известно, что в наностолбиках вследствие их малых размеров происходит частичная релаксация напряжений. Облучение наностолбиков электронным пучком не выявило сколько-нибудь существенного сдвига максимума излучения в синюю область, хотя интенсивность излучения падала, видимо, из-за роста углеродосодержащей пленки. В то же время облучение планарной структуры привело к смещению максимума излучения КЛ в синюю область и совпадению его положения с положением максимума излучения в наностолбиках (рис. 9). Такое совпадение

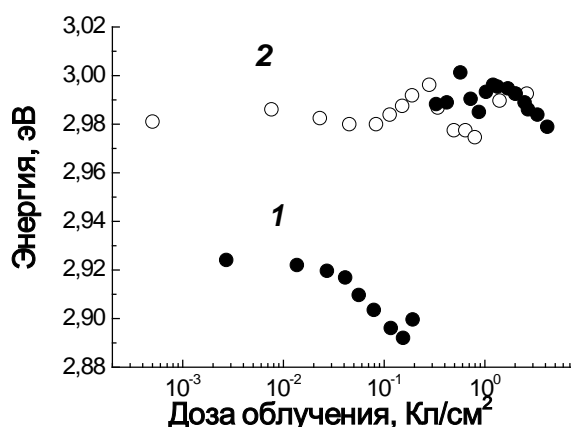


Рис. 9. Зависимости положения максимума основного пика КЛ для исходной структуры (кривая 1) и наностолбиков (кривая 2) от дозы облучения

спектров КЛ с большой долей вероятности свидетельствует о релаксации напряжений в активном слое светоизлучающих структур при облучении их электронным пучком.

При исследовании методом НТ влияния облучения электронным пучком на тонкие (толщина слоя над маской 6 мкм) ELOG пленки GaN было обнаружено скольжение проникающих дислокаций, а именно их сегментов, лежащих в базисной плоскости (рис. 10). Этот факт может рассматриваться как указание на наличие релаксации напряжений при LEEVI, поскольку скольжение дислокаций является одним из возможных механизмов такой релаксации. При этом сегменты дислокаций, лежащие в базисной плоскости, стремились при облучении к выравниванию вдоль направления [1-100]. Используя малые токи пучка, при облучении удалось определить средние скорости движения дислокаций в базисной плоскости от начала движения до их остановки: 9 нм/с при токе пучка 0,1 нА и 20 нм/с при 1 нА.

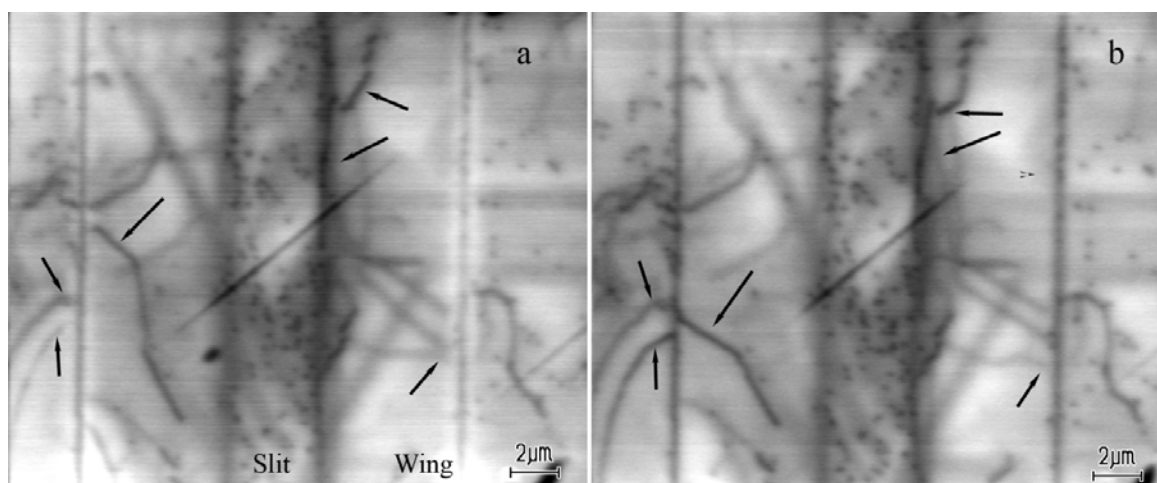


Рис. 10. Изображения в режиме НТ одной и той же области структуры ELOG пленки до (а) и после (б) облучения с током пучка $5 \cdot 10^{-8}$ А в течение 120 мин, доза облучения равна 60 Кл/см^2

Кроме того, при облучении ELOG пленки GaN было обнаружено движение наклонных сегментов дислокаций в призматических плоскостях. Этот факт заслуживает внимания, поскольку движение дислокаций именно в призматических плоскостях может приводить к их размножению и последующей деградации структуры (эффект размножения дислокаций является причиной деградации приборов на основе GaAs и InP). Движение вертикальных проникающих дислокаций не было обнаружено даже при самых высоких уровнях возбуждения.

Выводы

1. Впервые были проведены измерения локальных параметров латерально зарощенных пленок GaN: диффузионной длины неосновных носителей заряда и эффективной концентрации доноров. Было показано, что уровень легирования в областях вертикального роста не менее, чем в 3 раза превышает уровень легирования в латерально разросшихся областях пленки. При этом численной

корреляции между величиной диффузионной длины и плотностью дислокаций обнаружено не было.

2. Показано, что метод наведенного тока может применяться для визуализации каналов утечек тока в светодиодных структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN. Установлено, что метод наведенного тока дает возможность оценивать вероятность рекомбинации носителей заряда в квантовых ямах светоизлучающих структур.

3. Показано, что сдвиг пика излучения светодиодов при облучении электронным пучком обусловлен рождением новых, более интенсивных, линий излучения, смещенных в синюю область относительно исходной линии излучения. Полученные результаты облучения светоизлучающих структур низкоэнергетичным пучком можно объяснить в рамках предположения о локальной релаксации напряжений в активном слое светодиодов, не исключая полностью наличие процессов зарядки/перезарядки дефектов.

4. Установлено, что облучение даже с самыми низкими токами пучка приводит к скольжению фрагментов дислокаций, лежащих в базисной плоскости. При этом большая часть дислокаций остается неподвижной, а смещение сегментов дислокаций происходит на малые расстояния из-за наличия большого количества стопоров, таких как, например, проникающие дислокации. Была оценена скорость скольжения. Обнаружено, что дислокации могут двигаться в призматических плоскостях.

Список цитируемой литературы

- [1] Jain S.C., Willander M., Narayan J. and Van Overstraeten R. III-nitrides: Growth, characterization, and properties // J. Appl. Phys. — 2000. — V. 87. — P. 965–1006.
- [2] Leamy H.J. Charge collection scanning electron microscopy // J. Appl. Phys. — 1982. — V. 53. — P. R51–R80.
- [3] Holt D.B. // In: SEM Microcharacterization of Semiconductors. Ed. by D.B. Holt and D.C. Joy -Academ. Press. 1989. P. 241–338.
- [4] Yakimov E.B. Electron beam induced current investigations of electrical inhomogeneities with high spatial resolution // Scanning Microscopy. — 1992. — V. 6. — N. 1. — P. 81–96.
- [5] Якимов Е.Б. Модуляционные методы растровой электронной микроскопии // Заводск. лаб. — 1998. — Т. 64. — № 3. — С. 20–30.
- [6] Якимов Е.Б. Наведенный электронным пучком ток и его использование для характеристики полупроводниковых структур // Изв. АН СССР, Сер. физ. — 1992. — Т. 56. — № 3. — С. 31–44.
- [7] Wu C.J., Wittry D.B. Investigation of minority-carrier diffusion lengths by electron bombardment of Schottky barriers // J. Appl. Phys. — 1978. — V. 49. — P. 2827–2836.

- [8] Chi J.Y., and Gatos H.C. Determination of dopant-concentration diffusion length and lifetime variations in silicon by scanning electron microscopy // *J. Appl. Phys.* — 1979. — V. 50. — P. 3433–3440.
- [9] Bunker K.L., Garcia R., Russell P.E. Scanning electron microscopy cathodoluminescence studies of piezoelectric fields in an InGaN/GaN quantum-well light-emitting diode // *Appl. Phys. Lett.* — 2005. — V. 86. — P. 082108(1)–082108(3).
- [10] Ahmed M.E., Berkman E.A., Zavada J., El-Masry V. A. and Bedair S.M. Strain relaxation in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum well structures // *Phys. Status Solidi C.* — 2011. — V. 8. — N. 7–8. — P. 2034–2037.
- [11] Yu E.T., Dang X.Z., Asbeck P.M. and Lau S.S. Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III–V nitride Heterostructures // *J. Vac. Sci. Technol. B.* — 1999. — V. 17. — N. 4. — P. 1742–1749.

Список публикаций по теме диссертации

1. Greshnov A.A., Chernyakov A.E., Ber B.Y., Davydov D.V, Kovarskyi A.P., Shmidt N.M., Snegov F.M., Soltanovich O.A., Vergeles P.S., Yakimov E.B. Comparative Study of Quantum Efficiency of Blue LED with Different Nanostructural Arrangement // *Physica Status Solidi C.* — 2007. — V. 4. — N 8. — P. 2981–2985.
2. Бельник С.А., Вергелес П.С., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б. Дефекты со светлым контрастом в режиме наведенного тока в светоизлучающих структурах на основе GaN. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* — 2007. — Т. 7. — С. 34–37.
3. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Markov A.V., Yakimov E.B., Vergeles P.S., Kolin N.G., Merkurisov D.I., Boiko V.M., Lee In-Hwan, Lee, S.J. Pearton Cheul-Ro. Neutron Radiation Effects in Epitaxially Laterally Overgrown GaN Films // *J. Electronic Mater.* — 2007. — V. 36. — N 10. — P. 1320–1325.
- 4 Shmidt N.M., Vergeles P.S., Yakimov E.B. EBIC characterization of light emitting structures based on GaN // *Физика и Техника Полупроводников.* — 2007. — Т. 41. — Вып. 4. — С. 501–504.
5. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Lee In-Hwan, Lee Cheul Ro, Pearton S.J. Spatial variations of doping and lifetime in epitaxial laterally overgrown GaN // *Applied Physics Letters.* — 2007. — V. 90. — N 15. — P. 152114(1)–152114(3).
6. Вергелес П.С., Говорков А.В., Поляков А.Я., Смирнов Н.Б., Якимов Е.Б. Исследование пленок GaN, полученных методом латерального зарастивания, методом наведенного тока // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* — 2008. — Т. 9. — С.14–17.
7. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Markov A.V., Yakimov E.B., Vergeles P.S., Lee In-Hwan and Lee Cheul Ro, S.J. Pearton. Effects of laterally

- overgrown n-GaN thickness on defect and deep level concentrations // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* — 2008. — V. 26. — P. 990–994.
8. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Lee In-Hwan, Lee Cheul Ro, Pearton S.J. Donor nonuniformity in undoped and Si doped n-GaN prepared by epitaxial lateral overgrowth // *Applied Physics Letters.* — 2008. — V. 92. — P. 42118(1)–42118(3).
 9. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Govorkov A.V., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Lee In-Hwan, Lee Cheul Ro, Pearton S.J. EBIC investigations of defect distribution in ELOG GaN films // *Physica B.* — 2009. — V. 404. — P. 4916–4918.
 10. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Govorkov A.V., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Lee In-Hwan, Lee Cheul Ro, Pearton S.J. EBIC and CL studies of ELOG GaN films // *Superlattices and Microstructures.* — 2009. — V. 45, — N 4-5, — P. 308–313.
 11. Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Исследование ширины изображения дислокаций в режиме наведенного тока в пленках GaN и структурах на их основе // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* — 2009. — № 1. — С. 71–73.
 12. Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Markov A.V., Yakimov E.B., Vergeles P.S., Amano H., Kawashima T. Electrical properties and deep traps spectra in undoped M-plane GaN films prepared by standard MOCVD and by selective lateral overgrowth // *J. Crystal Growth.* — 2009. — V. 311. — N 10. — P. 2923–2925.
 13. Vergeles P.S., Shmidt N.M., Yakimov E.E., Yakimov E.B. Effect of low energy electron irradiation on optical properties of InGaN/GaN light emitting structures // *Physica Status Solidi C.* — 2011. — V. 8. — N 4. — P. 1265–1268.
 14. Vergeles P.S., Yakimov E.B. // EBIC investigation of InGaN/GaN multiple quantum well structures irradiated with low energy electrons // *J. Physics: Conference Series.* — 2011. — V. 281. — P. 012013(1)–012013(6).
 15. Вергелес П.С., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б. Исследование влияния облучения электронным пучком в РЭМ на катодолюминесценцию и наведенный ток в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* — 2011. — № 10. — С. 33–36.
 16. Shmidt N.M., Vergeles P.S., Yakimov E.E., Yakimov E.B. Effect of low-energy electron irradiation on the cathodoluminescence of multiple quantum well (MQW) InGaN/GaN structures // *Solid State Communications.* — 2011. — V. 151. — N 1. — P. 208–211.
 17. Вергелес П.С., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б. Влияние облучения электронным пучком в РЭМ на катодолюминесценцию и наведенный ток в InGaN/GaN светодиодах с заглубленной активной областью // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* — 2012. — № 11. — С. 22–26.

18. Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Температурная зависимость спектра катодолюминесценции облученных светодиодных структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2013. — № 9. — С. 38–41.
19. Vergeles P.S., Shmidt N.M., Yakimov E.B. Role of extended defects in the transformation of InGaN/GaN multiple quantum well structure optical properties under low energy electron beam irradiation // Physica Status Solidi C. — 2013. — V. 10. — N 3. — P. 464–467.
20. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Polyakov A.Y., Jeon Dae-Woo, Lee In-Hwan. Low Energy Electron Beam Irradiation Effect on Optical Properties of Nanopillar MQW InGaN/GaN Structures // AIP Conference Proceedings. — 2014. — V. 1583, — P. 268–271.
21. Yakimov Eugene B., Vergeles Paul S., Polyakov Alexander Y., Cho Han-Su, Jang Lee-Woon, Lee In-Hwan. Microcathodoluminescence spectra evolution for planar and nanopillar multi-quantum-well GaN-based structures as a function of electron irradiation dose // Journal of Vacuum Science & Technology B. — 2014. — V. 32. — N 1. — P. 011207(1)–011207(6).
22. Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Влияние обратного напряжения на оптические свойства исходных и облученных электронным пучком в РЭМ светодиодов с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — Т. 9. — С. 86–90.
23. Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Влияние облучения электронами низких энергий на оптические свойства структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN // Физика и Техника Полупроводников. — 2015. — Т. 49. — Вып. 2. — С. 149–154.
24. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Polyakov A.Y., Lee In-Hwan, Pearton S.J. Movement of basal plane dislocations in GaN during electron beam Irradiation // Applied Physics Letters. — 2015. — V. 106. — P. 132101(1)–132101(4).
25. Якимов Е.Б., Вергелес П.С. Скольжение дислокаций в пленках GaN, выращенных методом латеральной эпитаксии, стимулированное облучением электронами с низкой энергией // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2016. — Т. 9. — С. 81–84.
26. Yakimov E.B., Vergeles P.S., Polyakov A.Y., Lee In-Hwan, Pearton S.J. Radiation enhanced basal plane dislocation glide in GaN // Japan. J. Applied Physics. — 2016. — V. 55. — N 5S. — P. 05FM03(1)–05FM03(4).